

振镜激光扫描测量系统误差分析与补偿

王腾, 杨树明*, 李述胜, 袁野, 胡鹏宇, 刘涛, 贾书海

西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049

摘要 振镜扫描系统因其具有高速和高精度等优点被广泛应用于激光快速成型、激光精密打标和激光扫描测量等诸多领域,但因振镜系统的引入而存在系统测量误差。鉴于此,首先搭建线激光一维振镜扫描系统并采用双棋盘格标定板的标定方法对系统进行标定,然后建立系统的误差模型并对扫描过程中的测量误差进行理论分析,最后针对振镜转角误差提出一种基于查表法的补偿方法。实验结果表明,当测量工作距离为250 mm左右时,误差补偿后,中心距离的方均根误差从0.733 mm降低至0.061 mm,标准差从0.200 mm降低至0.060 mm,说明该方法能够显著提高系统的测量精度和鲁棒性。

关键词 机器视觉; 误差补偿; 振镜扫描; 线结构光测量

中图分类号 TH-39

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2315001

Error Analysis and Compensation of Galvanometer Laser Scanning Measurement System

Wang Teng, Yang Shuming*, Li Shusheng, Yuan Ye, Hu Pengyu, Liu Tao, Jia Shuhai

State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University,
Xi'an, Shaanxi 710049, China

Abstract Galvanometer scanning systems are widely used in various fields such as laser rapid prototyping, laser precision marking, and laser scanning measurement for their high speed and precision. However, system measurement errors are induced because of the introduction of a galvanometer system. In view of this, firstly, a linear laser one-dimensional galvanometer scanning system is built and calibrated by the double-checkerboard calibration method. Then, the error model of the system is established and the measurement error in the scanning process is theoretically analyzed. Finally, a compensation method based on the table look-up method is proposed for the galvanometer rotation error. The experimental results show that when the measuring working distance is about 250 mm, after the error compensation, the square root error of center distance decreases from 0.733 mm to 0.061 mm and the standard deviation from 0.200 mm to 0.060 mm. It follows that this method can significantly improve the measurement accuracy and robustness of the system.

Key words machine vision; error compensation; galvanometer scanning; linear structured light measurement

OCIS codes 150.6910; 150.1488; 150.0155

1 引 言

线结构光测量技术因其具有精度高、非接触、结构简单和稳定性高等特点而被广泛应用于尺寸测量^[1]、焊缝识别^[2]、机器视觉^[3]和逆向工程^[4-5]等诸多领域。传统的线结构光测量系统通常使用机械扫描平台来实现对被测对象的三维扫描测量,但扫描装置的惯性较大,造成测量速度较慢,而且整个系统

的体积较大且成本较高^[6]。

振镜扫描技术与线结构光测量技术的结合可以很好地解决这一问题,线激光经过振镜反射后投射到被测对象的表面,同步控制振镜转动与图像采集即可完成三维扫描测量。振镜扫描技术具有高速、高精度和小体积等诸多优点,因此可以实现高速的自扫描测量,并增强了系统的集成性与便携性。李旭东等^[7]设计了双振镜点扫描三维形貌测量系统,

收稿日期: 2020-07-13; 修回日期: 2020-08-03; 录用日期: 2020-08-07

基金项目: 国家优秀青年科学基金(51722509)、陕西省科技创新团队项目(2019TD-011)、陕西省重点研发计划(2020ZDLGY04-02)

* E-mail: shuming.yang@mail.xjtu.edu.cn

该系统可以实现对远距离、大尺寸物体的测量。Wagner 等^[8]开发了一套二维振镜点结构光扫描三维测量系统,使用该系统对病人头部软组织特征进行测量和三维重建,测量精度达到 0.3285 mm。Chi 等^[9]设计了一套水下一维振镜线结构光扫描系统,该系统对水下标准球的测量精度达到 0.25 mm。Yu 等^[10]设计了用于工业自动化生产线的一维振镜扫描系统,系统标定后的实验测量精度为 0.05 mm。

目前关于振镜结构光扫描测量系统的研究主要集中在系统的标定工作上^[11-13],但对于系统的误差分析却少有具体的研究。由于振镜系统的引入,对于传统的固定式线结构光测量系统的误差分析模型^[14]将不再完全适用,因此需要针对振镜扫描测量系统来建立新的误差分析模型。本文首先搭建一套振镜线结构光扫描系统,并提出一种新的系统标定方法。在此基础上,建立系统的误差模型并对其进行理论分析。最后,提出一种基于查表法的转动误差补偿策略。

2 系统搭建与标定

2.1 测量原理

与传统的线结构光测量系统相似,振镜扫描测量系统同样基于激光三角法原理而设计。不同之处在于,振镜扫描测量系统中的光平面与摄像机不再相对固定,位置会随着振镜的转动而改变。激光器发出的线激光经过振镜镜片反射后照射在被测物体的表面上,在物体表面上发生漫反射后被相机捕获并成像,应用三角测距原理可以求解得到被测物体表面的三维形貌信息,如图 1 所示。该系统可以实现测量与扫描的集成,避免由机械扫描平台带来的诸多限制。

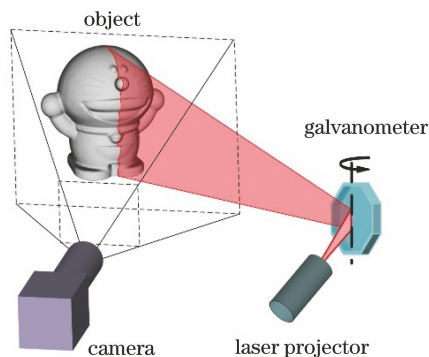


图 1 振镜激光扫描测量系统的工作原理示意图

Fig. 1 Working principle diagram of galvanometer laser scanning measurement system

2.2 系统搭建

振镜激光扫描测量系统由相机、激光器和振镜三

部分组成,如图 2 所示。相机(Ximea MQ013MG-ON)的分辨率为 1280 pixel \times 720 pixel,像素尺寸为 4.8 μ m \times 4.8 μ m,镜头焦距为 8 mm,激光器的波长为 450 nm,线宽小于 1 mm。振镜由一个带编码器的伺服电机(DYNAMIXEL Pro Plus H54P-100-S500-R)和一片由电机驱动的反光镜组成。三部分组成均安装在基板上,其中相机可以在水平方向上调整角度,确保相机视场与激光扫描范围最大程度的重合。

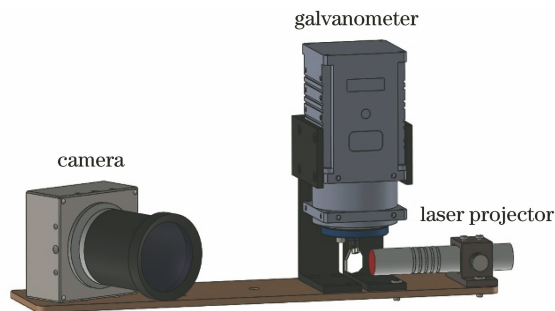


图 2 振镜激光扫描测量系统的结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of galvanometer laser scanning measurement system

理论上转轴穿过反射镜且与线激光平面的反射轴重合,但反射镜有厚度,则对称安装的方式会导致镜面偏移而产生测量误差,因此设计一种非对称的联轴器来补偿这一偏移,联轴器上、下两部分存在 1 mm 的偏心距离,镜片厚度为 2 mm,这可以保证电机转轴刚好穿过镜片。非对称的联轴器如图 3 所示。

2.3 系统标定

整个系统的标定分为两步:1)标定相机以获取相机的内参矩阵,标定装置在不同姿态下对应的外参矩阵;2)标定不同角度下的光平面方程,以求解振镜坐标系相对于相机坐标系的刚体变换矩阵。实验设计一种由双棋盘格组成的标定装置,其可以快速完成相机的标定并可以获取大量用于拟合光平面的标志点。

2.3.1 标定装置

将两块相互固定的 12 \times 9 棋盘格标定板作为标定装置,并使用其快速标定相机和系统。使用机械阻尼铰链将两块完全相同的棋盘格标定板连接成 V 字形,通过调整铰链可以使两标定板在 0 $^{\circ}$ ~180 $^{\circ}$ 之间的任意角度保持固定,从而获得最佳的标定结果。系统标定过程中,标定装置的夹角固定为 135 $^{\circ}$ 以保证两棋盘格标定板均位于相机景深范围内,如图 4 所示。

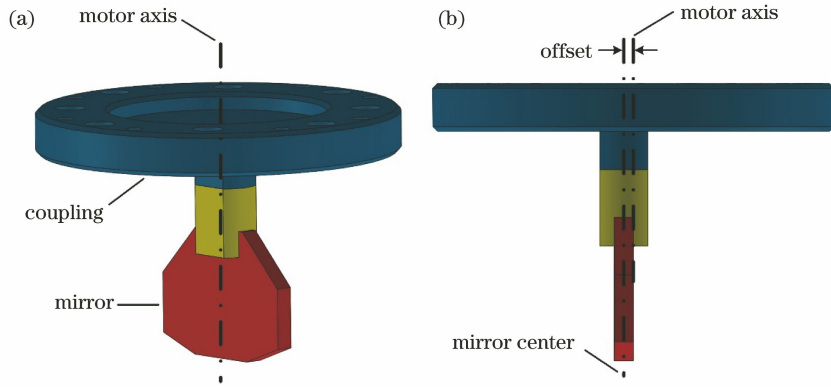


图 3 联轴器与振镜镜片的连接示意图。(a)轴侧图;(b)主视图

Fig. 3 Connection diagram of coupling and galvanometer lens. (a) Isometric view; (b) front view

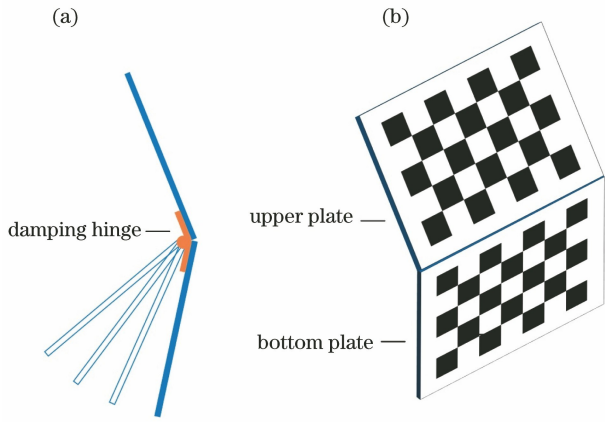


图 4 标定装置的结构示意图。(a)侧视图;(b)轴侧图

Fig. 4 Schematic of calibration device. (a) Side view; (b) isometric view

2.3.2 相机标定

根据针孔投影模型可建立像素坐标系 $O_p - uv$ 与世界坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 之间的映射关系,表达式为

$$\rho \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}_i \mathbf{K}_e \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: \mathbf{K}_i 和 \mathbf{K}_e 分别表示待标定的内参矩阵和外参矩阵; ρ 表示空间比例因子; $f_x = f/d_x$, $f_y = f/d_y$, f 表示镜头的物理焦距, d_x 和 d_y 表示 CCD (Charge Coupled Device) 相机的像素尺寸; (u_0, v_0) 表示图像的主点坐标; \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 分别表示相机坐标系与世界坐标系刚体变换的旋转矩阵与平移向量;

$\mathbf{0}^T$ 为 1×3 的零矩阵。

上述模型为理想情况下的针孔模型,对于实际的相机成像系统还需要考虑镜头的畸变,则实际像素坐标 (u_d, v_d) 与理想像素坐标 (u, v) 的关系可表示为

$$\begin{cases} u = u_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ v = v_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ r^2 = [(u_d - u_0)d_x]^2 + [(v_d - v_0)d_y]^2 \end{cases}, \quad (2)$$

式中: k_1 和 k_2 表示畸变参数。相机标定的过程即为求解 \mathbf{K}_i 、 \mathbf{K}_e 、 k_1 和 k_2 的过程。关于相机标定的方法已提出很多,如 Tisa 两步法^[15]、自标定法^[16]和张氏标定法^[17]等,其中张氏标定法因其具有设计灵活与高精度的特点而被广泛使用,实验采用张氏标定法对相机进行标定。

标定过程中,将标定物以不同的姿态放置在相机视场内并拍摄若干张图像。由于每张标定图像中含有两幅棋盘格图案,因此在标定前需要对图像进行分割,使得分割后的每幅图像只包含一幅完整的棋盘格图案,且图案在图像坐标系中的位置不变。标定结束后,可以得到相机的内参矩阵和棋盘格标定板在各个姿态下对应的外参矩阵。

2.3.3 系统标定

系统标定的核心在于将光平面的约束条件和相机成像模型统一到同一个坐标系下,从而确定二维像素坐标与三维物理坐标之间的映射关系,而系统标定前需要定义并建立系统中的各个坐标系。 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 为相机模型中的相机坐标系, $O_1 - x_1 y_1$ 为图像物理坐标系; $O_U - X_U Y_U Z_U$ 和 $O_D - X_D Y_D Z_D$ 分别为建立在上、下两个棋盘格标定板上的世界坐标系,坐标原点分别为各自棋盘格的左上角点, X 轴和 Y 轴的方向分别为棋盘格的行和列方

向, Z 轴方向根据右手定则确定, 如图 5 所示; $O_G - X_G Y_G Z_G$ 为振镜坐标系, 振镜转轴方向为 Y 轴方向, Y 轴与 $O_C X_C Z_C$ 平面的交点为原点, 当振镜转动角度 $\omega = 0^\circ$ 时, 激光平面的法线方向为 X 轴方向, 根据右手定则确定 Z 轴方向。

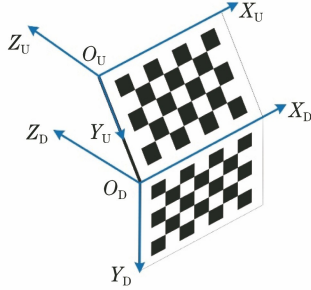


图 5 上、下两标定板上的世界坐标系

Fig. 5 World coordinate system on upper and bottom calibration plates

相机标定完成后, 保持标定物的最后一个位姿不变, 将振镜转动角度依次设置为 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n (n \geq 4)$ 并分别采集 n 幅激光条纹图像。采集到的激光条纹图像为一条折线, 折线的两端分别位于上、下标定板上, 如图 6 所示。首先采用图像分割算法将折线激光条纹分割成两条线段, 然后分别提取上、下标定板上的激光条纹像素坐标 (u_U, v_U) 和 (u_D, v_D) , 最后使用相机标定的外参数来计算激光条纹在相机坐标系中的三维坐标。

对于上标定板中的激光条纹, 根据世界坐标系的定义可知上标定板中所有点的 $Z_U = 0$, 因此(1)式可改写为

$$\rho \begin{bmatrix} u_U \\ v_U \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_U & \mathbf{T}_U \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_U \\ Y_U \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: \mathbf{R}_U 和 \mathbf{T}_U 分别表示上标定板世界坐标系相对

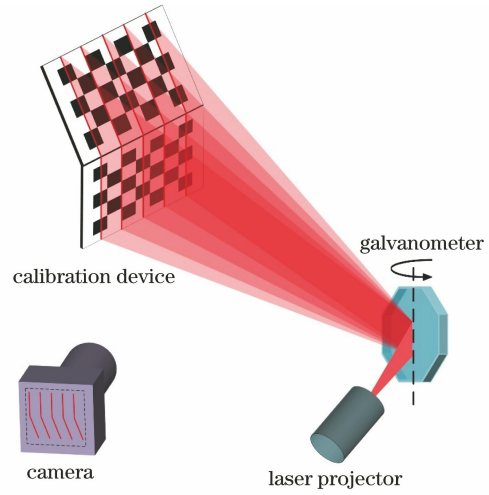


图 6 系统标定示意图

Fig. 6 Schematic of system calibration

于相机坐标系的旋转矩阵和平移向量; $(X_U, Y_U, 0)$ 表示上标定板中的点在世界坐标系下的坐标。其余参数已通过相机标定来获得, 因此可以计算不同控制电压下激光条纹的三维坐标 $(X_U, Y_U, 0)$ 。根据相机坐标系与世界坐标系之间的刚体变换关系可知

$$\begin{bmatrix} X_{UC} \\ Y_{UC} \\ Z_{UC} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_U \begin{bmatrix} X_U \\ Y_U \\ Z_U \end{bmatrix} + \mathbf{T}_U, \quad (4)$$

式中: (X_{UC}, Y_{UC}, Z_{UC}) 表示上标定板中的激光条纹在相机坐标系中的坐标; \mathbf{R}_U 和 \mathbf{T}_U 分别为

$$\mathbf{R}_U = \begin{bmatrix} r_{U1} & r_{U2} & r_{U3} \\ r_{U4} & r_{U5} & r_{U6} \\ r_{U7} & r_{U8} & r_{U9} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{T}_U = \begin{bmatrix} t_{U1} \\ t_{U2} \\ t_{U3} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

联合(3)~(6)式, 求解可得

$$\begin{cases} X_{UC} = \frac{Z_{UC}(u_U - u_0)}{f_x} \\ X_{UC} = \frac{Z_{UC}(v_U - v_0)}{f_y} \\ Z_{UC} = \frac{[r_{U7}(f_y r_{U5} + v_0 r_{U8}) - r_{U8}(f_y r_{U4} + v_0 r_{U7})][u_U - (f_x t_{U1} + u_0 t_{U3})] + [r_{U8}(f_x r_{U1} + u_0 r_{U7}) - r_{U7}(f_x r_{U2} + u_0 r_{U8})][v_U - (f_y t_{U2} + v_0 t_{U3})]}{(f_x r_{U1} + u_0 r_{U7})(f_y r_{U5} + v_0 r_{U8}) - (f_x r_{U2} + u_0 r_{U8})(f_y r_{U4} + v_0 r_{U7})} + t_{U3} \end{cases}. \quad (7)$$

对于下标定板中的激光条纹, 根据世界坐标系的定义可知下标定板中所有点的 $Z_D = 0$, 因此(1)式可改写为

$$\rho \begin{bmatrix} u_D \\ v_D \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_D & \mathbf{T}_D \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_D \\ Y_D \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中： \mathbf{R}_D 和 \mathbf{T}_D 分别表示下标定板世界坐标系相对于相机坐标系的旋转矩阵和平移向量； $(X_D, Y_D, 0)$ 表示下标定板中的点在世界坐标系下的坐标。其余参数已通过相机标定来获得，因此可以计算不同控制电压下激光条纹的三维坐标 $(X_D, Y_D, 0)$ 。根据相机坐标系与世界坐标系之间的刚体变换关系可知

$$\begin{bmatrix} X_{DC} \\ Y_{DC} \\ Z_{DC} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_D \begin{bmatrix} X_D \\ Y_D \\ Z_D \end{bmatrix} + \mathbf{T}_D, \quad (9)$$

式中： (X_{DC}, Y_{DC}, Z_{DC}) 表示下标定板中的激光条纹在相机坐标系中的坐标。 \mathbf{R}_D 和 \mathbf{T}_D 分别为

$$\mathbf{R}_D = \begin{bmatrix} r_{D1} & r_{D2} & r_{D3} \\ r_{D4} & r_{D5} & r_{D6} \\ r_{D7} & r_{D8} & r_{D9} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\mathbf{T}_D = \begin{bmatrix} t_{D1} \\ t_{D2} \\ t_{D3} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

联合(8)~(11)式,求解可得

$$\begin{cases} X_{DC} = \frac{Z_{DC}(u_D - u_0)}{f_x} \\ X_{DC} = \frac{Z_{DC}(v_D - v_0)}{f_y} \\ Z_{DC} = \frac{[r_{D7}(f_y r_{D5} + v_0 r_{D8}) - r_{D8}(f_y r_{D4} + v_0 r_{D7})][u_D - (f_x t_{D1} + u_0 t_{D3})] + [r_{D8}(f_x r_{D1} + u_0 r_{D7}) - r_{D7}(f_x r_{D2} + u_0 r_{D8})][v_D - (f_y t_{D2} + v_0 t_{D3})]}{(f_x r_{D1} + u_0 r_{D7})(f_y r_{D5} + v_0 r_{D8}) - (f_x r_{D2} + u_0 r_{D8})(f_y r_{D4} + v_0 r_{D7})} + t_{D3} \end{cases}. \quad (12)$$

设光平面的方程为 $Ax + By + Cz + D = 0$, 其中 A, B, C 和 D 为方程参数, (x, y, z) 为点的坐标。对于任意转动角度 ω_n , 对上述计算得到的激光条纹三维坐标进行最小二乘拟合可得光平面的单位法向量 $\mathbf{n}_n = (i_n, j_n, k_n)$ 。

设振镜坐标系的 X_G 轴、 Y_G 轴和 Z_G 轴在相机坐标系的单位方向向量分别为 $\mathbf{n}_x = (a_x, b_x, c_x)$ 、 $\mathbf{n}_y = (a_y, b_y, c_y)$ 和 $\mathbf{n}_z = (a_z, b_z, c_z)$ 。根据振镜坐标系的定义以及反射定律可知

$$\mathbf{n}_n \cdot \mathbf{n}_x = \cos 2\omega_n. \quad (13)$$

由于 $n \geq 4$, 因此(13)式为一个超定方程, 求解该方程可得 \mathbf{n}_x 。由振镜坐标系的定义可知, Y_G 轴与各个光平面的法向量垂直, 故有

$$\mathbf{n}_n \cdot \mathbf{n}_y = 0. \quad (14)$$

由于 $n \geq 4$, 因此(14)式为一个超定方程, 求解该方程可得 \mathbf{n}_y 。进一步根据三坐标轴互相垂直可得 $\mathbf{n}_z = \mathbf{n}_x \times \mathbf{n}_y$ 。

理想情况下, 所有激光平面应相交于 Y_G 轴所在的直线, 但存在安装误差, 实际情况为 Y_G 轴上存在一点 $P(x_0, y_0, z_0)$ 到所有光平面的距离最近, 联立所有光平面方程并进行最小二乘求解即可获得该点的坐标, 因此 Y_G 轴所在直线的方程为

$$\frac{x - x_0}{a_y} = \frac{y - y_0}{b_y} = \frac{z - z_0}{c_y}. \quad (15)$$

设振镜坐标系原点在相机坐标系中的坐标 (x_G, y_G, z_G) , 由振镜坐标系的定义得 $y_G = 0$, 联立(15)式可得

$$\begin{cases} x_G = x_0 - \frac{a_y}{b_y} y_0 \\ y_G = 0 \\ z_G = z_0 - \frac{c_y}{b_y} y_0 \end{cases}. \quad (16)$$

根据定义可得振镜坐标系相对于相机坐标系的旋转矩阵 \mathbf{R}_G 和平移向量 \mathbf{T}_G 分别为

$$\mathbf{R}_G = \begin{bmatrix} a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \\ c_x & c_y & c_z \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$\mathbf{T}_G = \begin{bmatrix} x_0 - \frac{a_y}{b_y} y_0 & 0 & z_0 - \frac{c_y}{b_y} y_0 \end{bmatrix}^T. \quad (18)$$

以相机坐标系为中间坐标系, 可建立振镜坐标系与像素坐标系之间的映射关系, 表达式为

$$\rho \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_G & \mathbf{T}_G \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

根据反射定律可知激光平面转动的角度 $\varphi = 2\omega$, 则激光平面的约束条件为

$$X_G \cos 2\omega - Z_G \sin 2\omega = 0. \quad (20)$$

联立(19)式和(20)式便可通过点的像素坐标求解得到其在振镜坐标系下的三维坐标。

3 测量模型与误差分析

3.1 测量模型

在理想的安装情况下, Y_G 轴与 Y_C 轴平行, 因

此对于任一固定的 Y_G 轴, 系统的测量模型如图 7 所示。其中 θ 为相机光轴与 Z_G 轴的夹角, α 和 β 分别为出射光和反射光与 X_G 轴的夹角, γ 为反射光与光轴的夹角, p 为图像坐标系下的光条纹长度。点 O_G 为振镜坐标系的原点, 点 O_C 为相机光心, 为简化计算过程假设其位于 X_G 轴上。直线 $O_C H$ 为相机光轴, $O_C O_G = B$ 为三角测量的基线距, $O_C H = L$ 为工作距离, Q 为被测物体上任意一点。

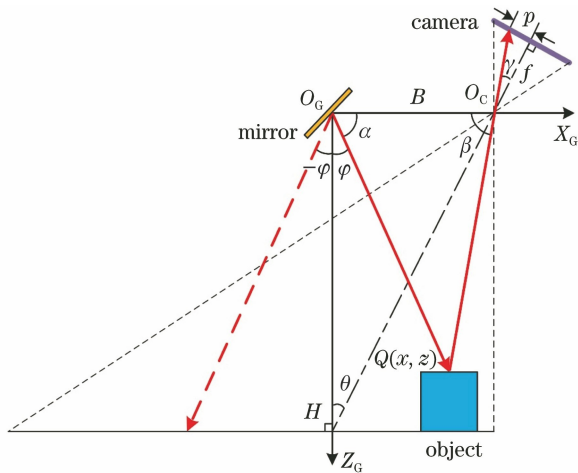


图 7 振镜扫描测量系统的模型示意图
Fig. 7 Schematic of model of galvanometer scanning measurement system

根据图 7 的几何关系可得

$$\begin{cases} x = z \tan \varphi \\ z = \frac{B \sin \alpha \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \\ \alpha = 90^\circ - \varphi \\ \beta = 90^\circ - \theta + \gamma \\ \tan \gamma = \frac{p}{f} \end{cases}, \quad (21)$$

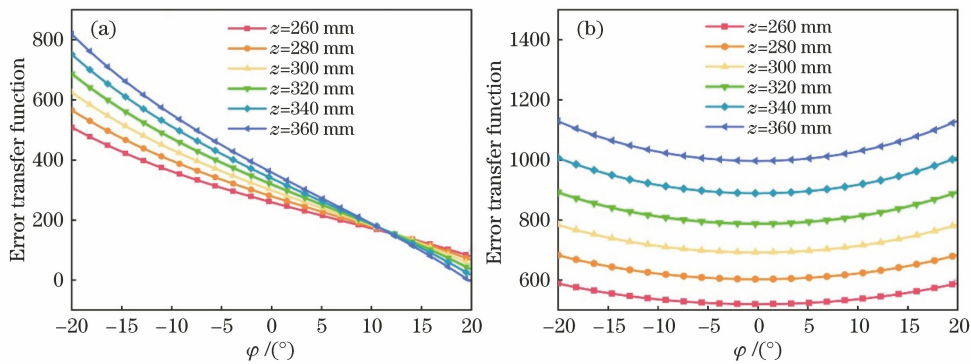


图 8 不同方向下 $\Delta\varphi$ 的误差传递函数曲线。(a) X 轴方向; (b) Z 轴方向

Fig. 8 Error transfer function curves of $\Delta\varphi$ in different directions. (a) X axis direction; (b) Z axis direction

从图 8 可以看到, 当系统存在恒定的 $\Delta\varphi$ 时, 光平面从左极限位置 $\varphi = -20^\circ$ 转动到右极限位置 $\varphi =$

进一步整理可得

$$\begin{cases} x = z \tan \varphi \\ z = \frac{B(f + p \tan \theta)}{(f \tan \theta - p) + \tan \varphi(f + p \tan \theta)} \end{cases}. \quad (22)$$

(22)式即为简化后的二维测量模型, 其中 B 、 θ 和 f 可以通过相机标定来得到, 因此系统的标定精度会通过以上参数来反映。 φ 和 p 为扫描过程中实时计算得到的参数, 其误差同样为三维坐标的测量误差。

3.2 误差分析

对于一个标定好的振镜扫描测量系统, 若不考虑系统标定本身的精度, 则测量误差主要来源于光平面定位误差 $\Delta\varphi$ 和激光条纹中心提取误差 Δp 。以下通过控制变量法来分析两种误差的误差传递函数在振镜扫描过程中的变化规律。

3.2.1 光平面定位误差

将保证控制变量为前提, 对以下理想过程进行误差分析。对一垂直于 Z_G 轴且距离点 O_G 为 l 的理想平面进行测量, 并假设 $\Delta p = 0$ 。对(22)式两边取微分可得 $\Delta\varphi$ 的误差传递函数, 表达式为

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{B(f \tan \theta - p)(f + p \tan \theta)}{[(f \tan \theta - p) + \tan \varphi(f + p \tan \theta)]^2 \cos^2 \varphi} \Delta \varphi \\ \Delta z = -\frac{B(f + p \tan \theta)^2}{[(f \tan \theta - p) + \tan \varphi(f + p \tan \theta)]^2 \cos^2 \varphi} \Delta \varphi \end{cases}. \quad (23)$$

对于搭建的系统, $f = 8$ mm, 激光平面的转动范围为 $-20^\circ \sim 20^\circ$, $B = 130$ mm, $L = 300$ mm, 则根据图 7 的几何关系有 $\tan \theta = B/L$ 。扫描过程中, 由于 z 值已知, 因此 p 值可根据(22)式来确定, 计算得到的误差传递函数曲线如图 8 所示。

20° , Δx 的误差传递函数曲线呈单调递减的趋势。 Z 轴误差 Δz 值随着 $|\varphi|$ 值的增大而增大, 在 $\varphi = 0^\circ$

处取得最小值。当 $\varphi < 10^\circ$ 时, Δx 值和 Δz 值随着 z 值的增大而增大。

3.2.2 光条纹中心提取误差

激光条纹中心线的提取误差是导致测量误差

的最直接原因之一,若认为激光条纹中心线的提取误差始终为一个恒定值,并且假设 $\Delta\varphi = 0$,对(22)式两边取微分可得 Δp 的误差传递函数,表达式为

$$\begin{cases} \Delta x = \Delta z \tan \varphi \\ \Delta z = \frac{B[\tan \theta (f \tan \theta - p) + (\tan \theta - 1)(\tan \varphi - 1)(f + p \tan \theta)]}{[(f \tan \theta - p) + \tan \varphi (f + p \tan \theta)]^2} \Delta p \end{cases} \quad (24)$$

(24)式中的系统参数与 3.2.1 节相同,同理计

算可得不同 z 值的误差传递函数曲线,如图 9 所示。

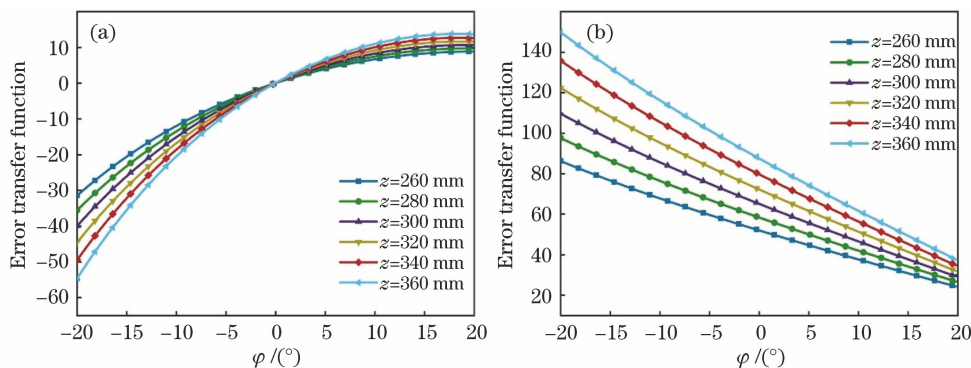


图 9 不同方向下 Δp 的误差传递函数。(a) X 轴方向;(b) Z 轴方向

Fig. 9 Error transfer function curves of Δp in different directions. (a) X axis direction; (b) Z axis direction

从图 9 可以看到,当系统存在恒定的 Δp 时, Δx 值随着 $|\varphi|$ 值的增大而增大,在 $\varphi = 0^\circ$ 处误差为 0,光平面位于 Z_G 轴右侧($\varphi > 0^\circ$)的误差整体小于位于 Z_G 轴左侧。当 φ 在 $-20^\circ \sim 20^\circ$ 之间取值时, Z 轴误差 Δz 呈单调递减的趋势。当 φ 为固定值时, Δx 值和 Δz 值均随着 z 值的减小而减小。因此,扫描过程中应尽量将被测物体放置在 $\varphi > 0^\circ$ 的扫描区域内,并且在保证测量范围的前提下缩小工作距离。

上述讨论的前提是 Δp 值始终保持不变,但实

际扫描过程中 Δp 值会受到被测物体表面形貌变化的影响。激光条纹的线宽随着入射光与被测物表面法线的夹角变大而变大,这会导致中心线的提取误差变大,模型如图 10(a)所示。另一方面,由于激光在被测物体表面上发生散射,当入射光不是垂直照射被测物体的表面时,CCD 像面上光条纹的灰度质心与几何中心将发生偏差^[14],这一偏差将直接进一步增大 Δp 值,如图 10(b)所示。综上所述,应尽量选择线宽小的线激光器以减小 Δp 值从而提高测量精度。

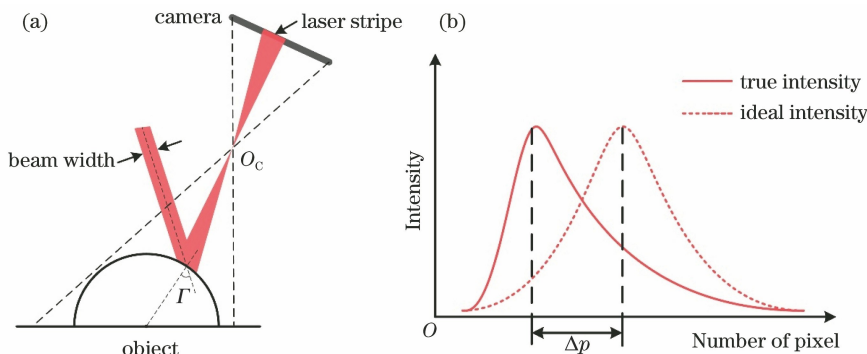


图 10 表面特性对 Δp 值的影响。(a)激光倾斜照射物体示意图;(b)灰度质心与几何中心之间的偏移曲线

Fig. 10 Effect of surface properties on Δp value. (a) Schematic of obliquely irradiated object with laser;

(b) offset curves between gray centroid and geometric center

3.2.3 系统标定误差

系统的标定误差主要来源于光平面方程误差和系统安装误差两个方面。由系统标定原理可知,在空间中每两条相交的激光条纹可以确定一个光平面方程,因此激光条纹坐标的提取精度将直接决定光平面拟合的精度。此外,相机标定参数误差会导致激光条纹坐标产生误差,进而导致光平面方程产生拟合误差。

系统安装误差主要来源于光平面与振镜转轴的
安装误差,理想情况下入射光平面会严格通过振镜转轴的轴线,计算多个反射光平面的交线即可标定

轴线方程。实际的装配过程中总是会存在系统安装误差,而入射光平面与转轴存在相交和平行两种可能的偏移情况,如图 11 所示。对于图 11(a)的情况,光平面与镜面的交线与转轴存在夹角 $\Delta\omega$,此时光平面的法线不再与转轴垂直,因此拟合得到的转轴直线与真实轴线存在偏差。对于图 11(b)的情况,光平面与镜面的交线与转轴平行且距离为 $\Delta\epsilon$,此时所有光平面不再交于一条直线,因此导致轴线的拟合结果出现偏差。振镜扫描的过程中, $\Delta\omega$ 值和 $\Delta\epsilon$ 值随着转动角度 φ 的变化而改变,因此有更复杂的非线性误差。

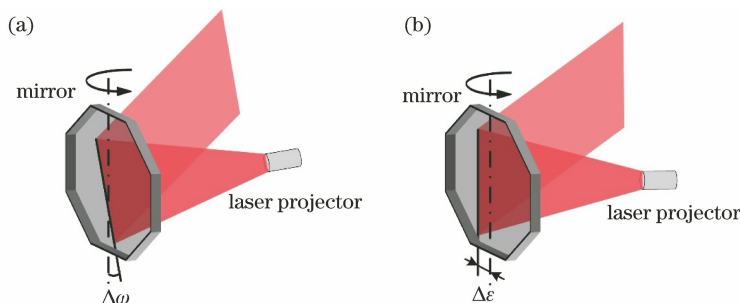


图 11 系统安装误差示意图。(a)光平面与转轴相交;(b)光平面与转轴平行

Fig. 11 Schematic of system installation error. (a) Light plane intersects axis of rotation; (b) light plane is parallel to axis of rotation

4 实 验

4.1 系统标定实验

首先采用张氏标定法对相机进行标定,两块 12×9 的棋盘格相互固定且呈 V 字形,格子边长为 10 mm,标定装置实物如图 12 所示。拍摄 10 个不同角度下的标定装置并分割得到 20 幅棋盘格标定图案,标定得到的相机内参数 $f=8.2664$ mm、 $u_0=674.1251$ 、 $v_0=517.2306$ 、 $k_1=0.1564$ 和 $k_2=0.4262$ 。相机标定的平均重投影误差为 0.0076 pixel,其中最后两幅棋盘格图像对应的平均重投影误差分别为

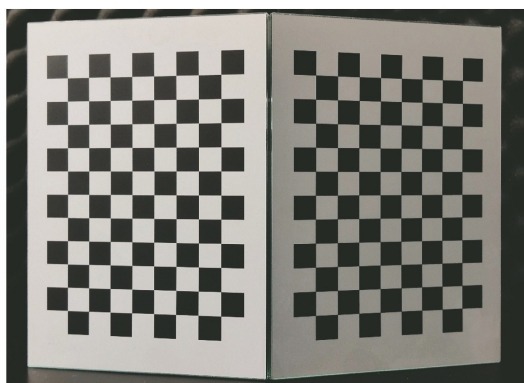


图 12 双棋盘格的标定装置

Fig. 12 Calibration device for double checkerboard

0.0079 pixel 和 0.0076 pixel,这表明相机标定的精度很高。保持标定装置的最后一个姿态不变,打开激光器并调整相机曝光,控制振镜转动 9 次并同时采集标定图像,采用标定算法对 9 个光平面进行拟合,得到相机坐标系下的光平面如图 13 所示。

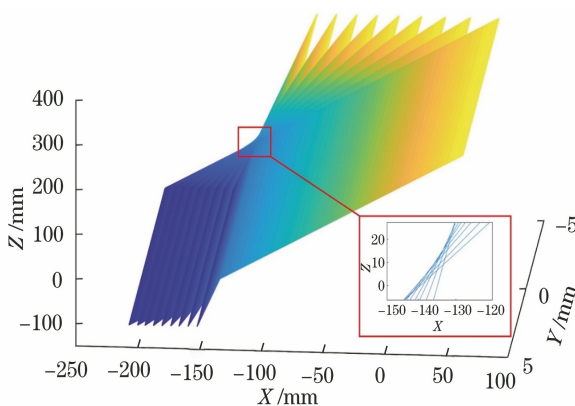


图 13 相机坐标系下光平面的拟合结果及其局部放大图

Fig. 13 Fitting results of light plane in camera coordinate system and its partial enlarged view

从图 13 可以看到,所有光平面无法相交于一条直线,所以会产生系统标定误差,产生这一误差的因素有由相机的标定误差导致的光平面拟合误差以及光平面与振镜转轴的系统安装误差两个。根据相机标定的重投影误差以及(7)式和(12)式,可以估算得

到激光条纹三维坐标的误差在 0.002 mm 以内,因此可以忽略由相机标定误差带来的影响。从图 13 放大图可以进一步看到,光平面相交的包络线呈弧形,这表明误差与镜片转动相关,故系统安装误差是导致系统标定误差的主要原因之一。通过最小二乘拟合来计算振镜转轴的直线方程,计算得到 \mathbf{R}_G 和 \mathbf{T}_G 分别为

$$\mathbf{R}_G = \begin{bmatrix} 0.8282 & -0.0059 & -0.5603 \\ -0.0102 & -0.9999 & -0.0048 \\ -0.5603 & 0.0097 & -0.8282 \end{bmatrix}, \quad (25)$$

$$\mathbf{T}_G = [-134.7121 \quad 0 \quad 9.6591]^T. \quad (26)$$

4.2 转角误差补偿

系统标定完成后,对一棋盘格标定板进行扫描测量,而三维点云在垂直方向上存在明显的起伏波动,并且同一条激光条纹的点云之间不存在这种偏差,因此偏差应主要来源于激光平面的定位误差。

为了进一步确定点云波动的具体误差来源,控制振镜从 0° 开始转动,步进角度设置为 $\omega = 0.1^\circ$,扫描线数设置为 90,利用双棋盘格标定装置来计算标定得到 90 个激光平面的方程并计算相邻光平面之间的夹角,结果如图 14 所示。从图 14 可以看到,理论上相邻光平面之间的夹角 $\varphi = 2\omega = 0.2^\circ$,然而实际标定得到的夹角与理论值存在明显误差,且光平面位置不同误差不同。因此,可以判断点云的波动偏差来源于振镜转动误差 $\Delta\varphi$, $\Delta\varphi$ 产生的原因是伺服电机实际的转动角度与编码器的角度值之间存在误差。

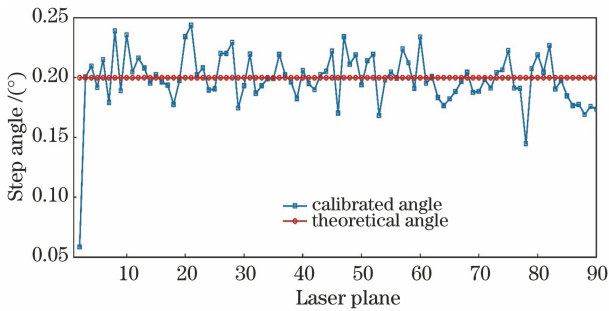


图 14 相邻光平面的夹角误差曲线

Fig. 14 Angle error curves of adjacent light planes

4.2.1 误差补偿策略

针对存在的 $\Delta\varphi$,当伺服电机在固定的角度范围内转动时,转动误差为系统误差和随机误差的组合,即多次转动的夹角误差曲线存在重复性,因此可以通过多次标定来计算每个角度的转动误差。由于第一个光平面的理论角度为 0° ,且光平面转动的步长为 0.2° ,因此对于扫描过程中第 s 个光平面,其理论角度位置为 $0.2(s-1)$,故误差计算公式为

$$\delta_s = \varphi_s - 0.2(s-1), \quad (27)$$

式中: δ_s 表示第 s 个光平面处的角度误差; φ_s 表示第 s 个光平面的实际角度位置,通过拟合计算光平面而得到。重复进行 10 次标定实验,在每个光平面处根据(27)式来计算角度误差,取 10 次计算结果的平均值作为该位置处最终的角度误差,结果如图 15 所示。

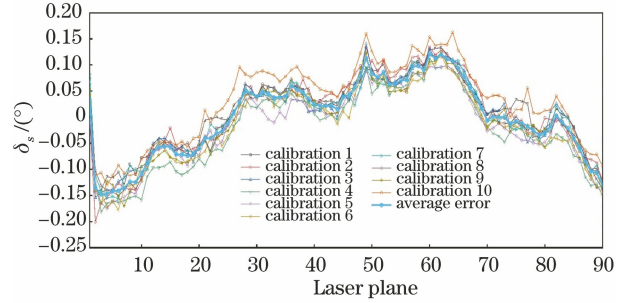


图 15 光平面转动误差的标定曲线

Fig. 15 Calibration curves of optical plane rotation error

误差曲线标定完成后,采用查表法对任意位置处的编码器角度值进行补偿,从而得到真实的激光平面角度并进行三维重建。图 15 的误差补偿曲线仅包含 90 个误差数据,当改变步进角度时,采用线性插值算法重新估算每个光平面处的误差补偿值。

4.2.2 补偿效果测试

为了评估误差补偿效果,对棋盘格平板进行扫描测量,三维重建前后得到的点云如图 16 所示。从图 16 可以看到,补偿后的点云波动现象基本消失,

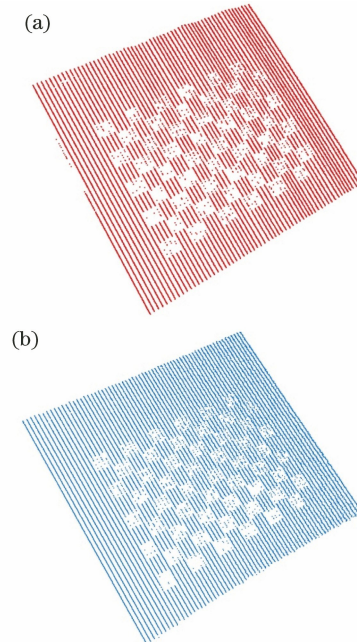


图 16 棋盘格平板的三维点云。(a)原始图像;(b)误差补偿后

Fig. 16 Three-dimensional point cloud of checkerboard flat panel.

(a) Original image; (b) after error compensation

这表明误差补偿对三维重建的精度有明显提升。

为了进一步验证误差补偿对测量精度的提升效果,对陶瓷标准球进行测量以估计系统测量误

差,结果如图 17 所示,其中球 A10 的标称直径为 29.9932 mm,球 B10 的标称直径为 30.0055 mm,两球球心距的标称值为 59.9550 mm。

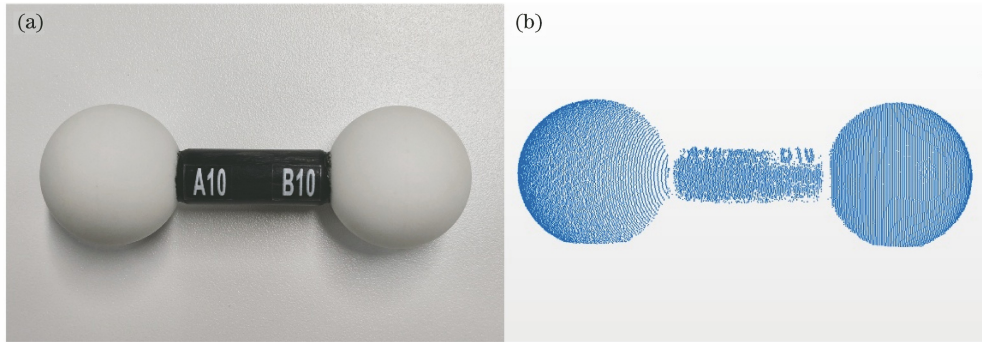


图 17 陶瓷标准球。(a)实物图;(b)三维点云

Fig. 17 Ceramic standard ball. (a) Physical image; (b) 3D point cloud

将标准球随机放置在 $L = 250$ mm 附近的 10 个位置处,使用误差补偿后的系统对其进行 10 次测量,某次测量得到的三维点云如图 17(b)所示。对测量得到的两片球面点云进行最小二乘拟合以得到各自的拟合直径,并根据拟合得到的球心坐标来

计算球心距。使用未经过误差补偿的系统对其进行 10 次测量实验并作为对比组。

测量得到的结果如表 1 和表 2 所示。从表 1 可以看到,A10 的直径均值为 29.495 mm,B10 的直径均值为 29.558 mm,球心距均值为 59.250 mm,说明

表 1 误差补偿前标准球的测量结果

Table 1 Measurement results of standard ball before error compensation

Ball position	Diameter of A10 /mm	Diameter of B10 /mm	Center distance /mm	Diameter error of A10 /mm	Diameter error of B10 /mm	Center distance error /mm
1	29.780	29.659	59.044	-0.226	-0.347	-0.911
2	29.627	29.748	58.976	-0.379	-0.258	-0.979
3	29.428	29.448	59.277	-0.578	-0.558	-0.678
4	29.269	29.259	59.418	-0.736	-0.746	-0.537
5	29.550	29.264	59.617	-0.456	-0.741	-0.338
6	29.497	29.682	59.307	-0.508	-0.324	-0.648
7	29.312	29.796	59.447	-0.694	-0.210	-0.508
8	29.405	29.488	59.110	-0.601	-0.517	-0.845
9	29.747	29.686	59.292	-0.259	-0.320	-0.663
10	29.335	29.552	59.013	-0.671	-0.454	-0.942

表 2 误差补偿后标准球的测量结果

Table 2 Measurement results of standard ball after error compensation

Ball position	Diameter of A10 /mm	Diameter of B10 /mm	Center distance /mm	Diameter error of A10 /mm	Diameter error of B10 /mm	Center distance error /mm
1	30.121	30.063	60.069	0.116	0.070	0.114
2	29.963	30.042	60.049	-0.043	0.049	0.094
3	30.091	30.099	60.019	0.086	0.106	0.064
4	30.008	30.057	59.956	0.002	0.064	0.001
5	30.091	29.988	59.932	0.085	-0.005	-0.023
6	30.061	30.099	59.909	0.055	0.106	-0.046
7	30.041	30.021	59.934	0.035	0.028	-0.021
8	29.979	29.943	59.971	-0.026	-0.051	0.016
9	30.117	30.078	59.893	0.111	0.085	-0.062
10	30.119	30.112	59.893	0.114	0.119	-0.062

由转动导致测量误差很大且相比标称数据整体偏小。从表 2 可以看到, A10 的直径均值为 30.059 mm, B10 的直径均值为 30.050 mm, 球心距均值为 59.960 mm, 说明误差补偿后的测量精度有明显提升。

图 18 为两球直径和球心距在补偿前后随着测量

位置变化的误差曲线。从图 18 可以看到, 误差补偿后, 两球直径的测量误差显著降低, 球心距的测量误差同样显著降低。表 3 为补偿前后三项测量值的方均根误差 (RMSE)。从表 3 可以看到, 补偿后的 RMSE 分别降低 85.50%、84.06% 和 91.68%。

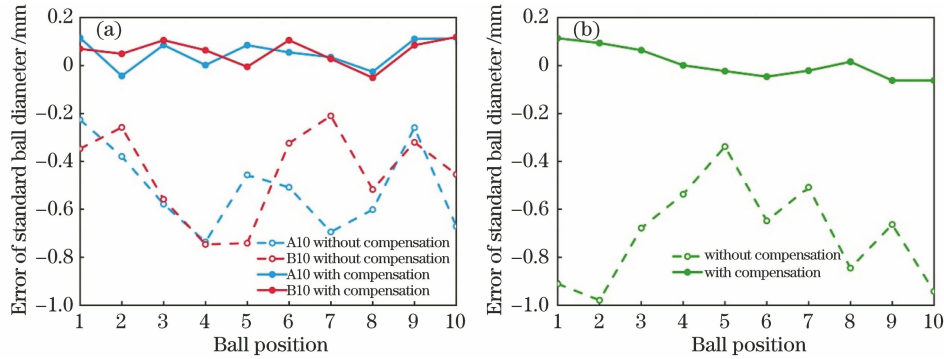


图 18 不同情况下的误差曲线。(a)标准球直径;(b)球心距

Fig. 18 Error curves under different conditions. (a) Standard ball diameter; (b) ball center distance

表 3 误差补偿对 RSME 和标准差的影响

Table 3 Influence of error compensation on RSME and standard deviation

Items	Before error compensation			After error compensation			Decreased percentage		
	A10 /mm	B10 /mm	Center distance /mm	A10 /mm	B10 /mm	Center distance /mm	A10 /%	B10 /%	Center distance /%
RSME	0.538	0.483	0.733	0.078	0.077	0.061	85.50	84.06	91.68
Standard deviation	0.170	0.181	0.200	0.056	0.051	0.060	67.06	71.82	70.00

从表 3 可以看到, 误差补偿后, 三项测量误差的标准差分别降低 67.06%、71.82% 和 70.00%, 这表明误差补偿方法在提高系统测量精度的同时还可以提高系统的稳定性, 测量精度有较大的提升, 补偿后中心距离的 RMSE 从 0.733 mm 降低至 0.061 mm, 标准差从 0.200 mm 降低至 0.060 mm。根据理论误差分析得出的结论可知, 当存在 $\Delta\varphi$ 时, 系统在不同位置处的测量误差随着光平面位置的变化而改变, 这正是导致补偿前测量误差标准差偏大的主要原因之一。

最后, 使用误差补偿后的系统对 3D 打印模型和石膏模型进行扫描测量, 并对多个视角的点云进行拼接和表面三维重建, 结果如图 19 所示, 其中 3D 打印模型的长宽高约为 130 mm × 100 mm × 130 mm, 石膏模型的长宽高约为 90 mm × 90 mm × 150 mm。从图 19 可以看到, 补偿后的点云测量结果可以准确重建被测物体的表面细节, 重建得到的曲面光滑且连续。

5 结 论

搭建一套振镜式线结构光扫描测量系统, 并提出一种操作简单和成本较低的系统标定方法, 该方法可以快速完成相机标定和系统标定。随后建立振镜扫描系统的测量模型并对系统测量误差进行详细分析。针对振镜电机存在较大转动定位误差的问题, 提出一种基于查表法的误差补偿方法, 通过多次标定来估算并补偿定位误差。使用陶瓷标准球对系统的测量误差进行评估, 实验结果表明补偿后的测量精度有较大的提升, 同时测量误差的标准差显著降低, 因此该补偿方法能够有效提升系统的测量精度和稳定性。需要指出的是, 该方法不能完全消除转动误差对系统测量精度的影响, 因此系统的测量精度仍有较大的提升空间。后续工作将通过补偿系统存在的非线性误差以及激光线中心提取误差来进一步提高测量精度。

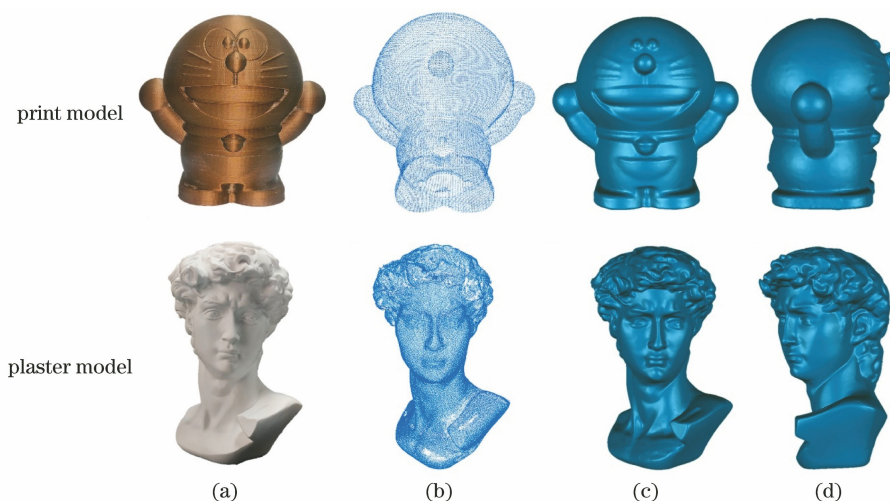


图 19 3D 打印模型和石膏模型的测量结果。(a)模型实物;(b)三维点云;(c)主视图;(d)侧视图

Fig. 19 Measurement results of 3D printed models and plaster models. (a) Real models;

(b) 3D point clouds; (c) front views; (d) side views

参 考 文 献

- [1] Wei Y J. The research on measurement method of engine blade profile based on line structured light [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017: 4-7.
魏英杰. 基于线结构光的发动机叶片轮廓测量方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017: 4-7.
- [2] Lei Z L, Shen J X, Li B W, et al. Recognition of narrow-gap edge welding seam based on autonomous threshold value[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0815011.
雷正龙, 沈健雄, 黎炳蔚, 等. 基于自动阈值的窄间隙端接焊缝识别技术[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0815011.
- [3] Yin S B, Ren Y J, Liu T, et al. Review on application of machine vision in modern automobile manufacturing[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0815001.
尹仕斌, 任永杰, 刘涛, 等. 机器视觉技术在现代汽车制造中的应用综述[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0815001.
- [4] Park S C, Chang M. Reverse engineering with a structured light system[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 57(4): 1377-1384.
- [5] Yang S M, Shi X Y, Zhang G F, et al. A dual-platform laser scanner for 3D reconstruction of dental pieces[J]. Engineering, 2018, 4(6): 796-805.
- [6] Xie Z X, Zhang A Q. Simultaneous calibration of the intrinsic and extrinsic parameters of ultra-large-scale line structured-light sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0315001.
解则晓, 张安祺. 超大尺度线结构光传感器内外参数同时标定[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0315001.
- [7] Li X D, Cui L, Zhao H J, et al. Three-dimensional shape measurement system based on dual oscillating mirrors with point scanning[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(7): 1648-1653.
李旭东, 崔磊, 赵慧洁, 等. 双振镜点扫描三维形貌测量系统[J]. 光学精密工程, 2010, 18(7): 1648-1653.
- [8] Wagner B, Stüber P, Wissel T, et al. Accuracy analysis for triangulation and tracking based on time-multiplexed structured light [J]. Medical Physics, 2014, 41(8): 082701.
- [9] Chi S K, Xie Z X, Chen W Z. A laser line auto-scanning system for underwater 3D reconstruction [J]. Sensors, 2016, 16(9): 1534.
- [10] Yu C Y, Chen X B, Xi J T. Modeling and calibration of a novel one-mirror galvanometric laser scanner[J]. Sensors, 2017, 17(1): 164.
- [11] Cui S C, Zhu X, Wang W, et al. Calibration of a laser galvanometric scanning system by adapting a camera model[J]. Applied Optics, 2009, 48(14): 2632-2637.
- [12] Xie Z X, Chi S K, Wang X M, et al. Calibration method for structure-light auto-scanning measurement system based on coplanarity[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(3): 0308003.
解则晓, 迟书凯, 王晓敏, 等. 基于共面法的结构光自扫描测量系统参数标定方法[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0308003.
- [13] Yang S M, Yang L L, Zhang G F, et al. Modeling and calibration of the galvanometric laser scanning three-dimensional measurement system[J]. Nanomanufacturing and Metrology, 2018, 1(3): 180-192.
- [14] Zhou L M, Hu D Z, Lu B H. A study of the

- precision factors of the laser scanning triangulation method[J]. Acta Metrologica Sinica, 1998(2): 3-5.
- 周利民, 胡德洲, 卢秉恒. 激光扫描三角法测量精度因素的分析与研究[J]. 计量学报, 1998(2): 3-5.
- [15] Tsai R. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. IEEE Journal on Robotics and Automation, 1987, 3(4): 323-344.
- [16] Faugeras O D, Luong Q T, Maybank S J. Camera self-calibration: theory and experiments[M]//Sandini G. Computer vision-ECCV'92. Lecture notes in computer science. Heidelberg: Springer, 1992, 588: 321-344.
- [17] Zhang Z Y. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]//Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, September 20-27, 1999, Kerkyra, Greece. New York: IEEE, 1999: 666-673.